

UTILIZACION DEL AGUA CALIENTE RESIDUAL DE LA CENTRAL TERMICA DE CASTELLON PARA EL CALENTAMIENTO DEL SUELO EN INVERNADEROS

F. Juste, R. Diaz

Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias
MONCADA (VALENCIA)

Abstract

The use of waste water from the Power Plant of Castellón for agricultural purposes is reported here. The heating of soil is implemented by a buried piping system, through which the hot water runs. The effects of this water on precocity and production of a number of horticultural crops have been evaluated. In addition to these effects on cultures, the heat flow in the soil both using buried and superficial piping has been studied, and also the influence of water temperature, flow rate, and tubing network. The results obtained show that the production of tomato and strawberry occurs about 20 days ahead, together with an increase of 20-30% in development and yield in both crops. To study the heat flow in the soil, two theoretical models have been checked with experimental data from soil benches in a greenhouse.

Resumen

En este trabajo se ha estudiado el aprovechamiento agrícola del agua caliente residual procedente de la Central Térmica de Castellón. El calentamiento del suelo se realiza mediante un sistema de tuberías enterradas por las que circula el agua caliente y sus efectos se han medido sobre la precocidad y producción de algunos cultivos hortícolas. Además de estos efectos sobre el cultivo se ha estudiado la transmisión de calor en el suelo con tuberías enterradas y superficiales y la influencia de la temperatura del agua, caudal y distribución de tubos. Los resultados obtenidos sobre tomate y fresas indican un adelanto en la producción de fresas de unos 20 días y un aumento del desarrollo y producción en ambos cultivos de un 20-30%.

Para el estudio de la transmisión de calor en el suelo se han desarrollado dos modelos teóricos y comprobado sus resultados con los datos experimentales obtenidos en unas bancadas de suelo.

1. Introducción

El calor residual procedente de las centrales eléctricas es una gran fuente de energía que puede utilizarse fácilmente en numerosas aplicaciones, pero especialmente en la agricultura. La Central Térmica de Castellón se halla situada a orillas del mar Mediterráneo a una latitud de 40° y en una zona eminentemente agrícola. Las temperaturas medias en invierno oscilan entre 10-11°C existiendo un riesgo de heladas de hasta 2-3°C bajo cero en los meses de Enero-Febrero. La Central Térmica a pleno funcionamiento tiene una potencia de 1080 MW y emplea para su refrigeración agua de mar con un caudal de 8-10 m³/s. Este agua a la salida de

la Central sufre un incremento de temperatura de 10-12°C según la época del año y las condiciones de carga de la Central. En los meses más fríos puede esperarse unas temperaturas del agua entre 20 y 27°C.

El gran problema para la utilización de este calor residual estriba en la baja temperatura del agua pero por el contrario se dispone de una gran cantidad de agua. En algunos trabajos realizados con el mismo objetivo se intentó aprovechar el calor residual para calentamiento del suelo a cielo abierto, SKAGGS et al. (1976); BOERSMA, L., et al. (1974); SONDERN, J.A. (1977), encontrando casi todos, en cultivos de principio de primavera, un mayor desarrollo de las plantas con suelo caliente. MULLER, A. (1979) en Francia, obtiene únicamente ligeros aumentos de producción para maíz, patatas y tabaco, debido a la baja temperatura del agua circulante por tubos. En general, puede deducirse de los distintos trabajos que los incrementos de producción oscilan entre el 20% y el 40%, dependiendo fundamentalmente del período de plantación, tipo de cultivo y lugar.

También se han publicado numerosos trabajos en los que la energía residual trataba de ser aprovechada en calentamiento de invernaderos. En algunos de ellos el calentamiento se producía por cables eléctricos enterrados en el suelo (RYKBOST, K. et al., 1975; WILLIAMS, G., 1973). Sin embargo, en la mayoría de los casos el agua se calienta artificialmente, estudiando el fenómeno de la transmisión del calor en el suelo, y los efectos en algunos cultivos, sobre superficies reducidas (De WALLE, D., 1974; SKAGGS, R. et al., 1976; BOYD et al., 1977). En estos trabajos de simulación, junto a otros en los que se emplea el agua directamente de la central (GUILLERMIN, P., 1976; SORESSI, G., 1982) se obtienen resultados muy positivos en cuanto al desarrollo de los cultivos, precocidad y producción con el calentamiento del suelo, pero únicamente en cultivos de primavera y de otoño.

Basándonos en estas experiencias el proyecto iniciado en Castellón, intenta conocer las posibilidades de aplicación del agua caliente de la Central Térmica a cultivos hortícolas intensivos de invierno y principios de primavera.

2. Descripción general de los proyectos

El trabajo se ha desarrollado, por una parte "in situ", es decir en terrenos colindantes a la Central Térmica. Estos terrenos son zonas de marjales de elevada salinidad y con una capa freática muy superficial. Una vez acondicionado el terreno experimental, mediante una red de drenajes, y un aporte suplementario de tierra y arena se consiguió bajar la capa freática a 50-60 cm. de profundidad y mantener la salinidad del suelo en unos 3.000 micromhos/cm.

Por otra parte, se trató de evitar la heterogeneidad del suelo anterior, así como la variabilidad de las condiciones del clima, con el fin de hacer un estudio teórico de la transmisión de calor en el suelo. Para ello se construyó una "mesa de suelo", en el interior de un invernadero en el I.V.I.A. Se eligió como suelo arena de playa y como sistema de calefacción un depósito de agua calentada eléctricamente, que circula por

una red de tuberías de polipropileno coarrugadas, colocadas en dos posiciones: superficialmente, primero, y enterradas a 15 cm. de profundidad, después.

2.1. Diseño de la parcela experimental de Castellón

La parcela experimental está situada a una distancia de unos 500 m. de la toma de agua caliente. Tiene una superficie de unos 1.152 m² (32 m x 36 m) de suelo caliente y otra zona similar para suelo testigo.

El sistema de calentamiento del suelo es por una red de tubos de polietileno negro de baja densidad, enterrada en el suelo a una profundidad de 35 cm. y separados unos 55 cm. entre sí. La impulsión de agua caliente se realiza mediante dos electrobombas que trabajan alternativamente y que suministran un caudal de 43.000 l/h, y por una tubería de 550 m. de longitud, de PVC, con un diámetro de 125 mm. aislada con fibra de vidrio y recubrimiento asfáltico.

El coste más importante de la instalación lo constituyen las uniones en las cabeceras de cada parrilla entre los tubos de polietileno y los de PVC. En dichas uniones se colocaron juntas metálicas, para asegurar una perfecta estanqueidad. En los dos años de funcionamiento de la instalación no se ha apreciado ningún problema.

Para observar el efecto producido por el calentamiento del suelo sobre los cultivos elegidos, se distribuyeron en el terreno con arreglo a la forma siguiente: Suelo, al aire libre, sin calentar (T1); Suelo calentado, al aire libre (T2); Invernadero con suelo sin calentar (T3); Invernadero con suelo caliente (T4).

Estas experiencias se realizaron en los dos primeros años, pero vistos los resultados de la parcela al aire libre, únicamente se siguió trabajando con los cultivos en invernadero.

2.2. Diseño de la bancada experimental

Con objeto de conocer la transmisión de calor en el suelo por tuberías de agua caliente y controlar el mayor número posible de variables en 1985, se construyó una bancada experimental que consistía en una capa de arena de 40 cm. de espesor sobre una mesa de chapa galvanizada. Las dimensiones son de 2,5 m. x 2,5 m. para la unidad que va a ser calentada y de 1,25 m. x 1,25 m. para la unidad testigo. Estas dos mesas de suelo van aisladas en el fondo y laterales con plástico y una placa de poliuretano de 4 cm. de espesor para evitar pérdidas de calor por conducción.

En cada una de las mesas se ha construido un túnel de plástico para conocer el efecto del calentamiento de los tubos sobre el ambiente y compararlo con el túnel testigo. Estos tuneles están instalados dentro de un invernadero de plástico con un sistema de ventilación cenital que mantiene temperaturas en el invernadero similares al exterior pero evita el efecto del viento sobre los túneles.

El sistema de calefacción está formado por una parrilla de tubos para

llos colocados a 15 cm. de separación y conectados de tal forma que puede conseguirse que el agua caliente circule por tubos con separaciones de 15, 30 ó 60 cm. La tubería es de polipropileno coarrugada de 3/4".

El calentamiento del agua se realiza mediante una resistencia eléctrica. El sistema dispone de una bomba de impulsión que funciona únicamente cuando la temperatura ambiente del túnel caliente es menor que la temperatura del agua. Se dispone además de un medidor de caudal, de un contador de energía y de un contador de las calorías aportadas al suelo.

2.3. Funcionamiento y toma de datos

Las temperaturas del agua a la salida de los condensadores es en general muy variable dependiendo de la temperatura del agua de mar y del nivel de carga de la Central. Para los meses de invierno las temperaturas son bastante bajas durante la noche (20-24°C) y oscilan entre 25-28°C durante el día. Debido a estas bajas temperaturas el sistema de calentamiento tenía un funcionamiento continuo a lo largo del día para intentar aportar al suelo el máximo calor posible.

La toma de datos, además de los propios del cultivo, consistía en medir caudales y temperaturas del agua, suelo y ambiente. Para el control de temperaturas se dispone de un sistema de 15 sondas de platino distribuidas en tuberías y suelo según las mediciones a realizar. Asimismo se ha medido humedad y densidad del suelo y la influencia de estos parámetros sobre la conductividad térmica del suelo.

Durante 1985 la Central Térmica no funcionó por lo que las experiencias se realizaron en las mesas de suelo descritas anteriormente. En estos suelos, al igual que en las parcelas experimentales, se midieron las temperaturas en suelo y ambiente y las energías aportadas y perdidas. El sistema de toma de datos está formado por termopares de cobre-constantan que pueden controlar hasta 50 puntos de medición. Estos termopares están conectados con un equipo de medida que realiza barridos periódicos y almacena los datos en cassette para su posterior análisis en ordenador.

3. Transmisión de calor en el suelo y ambiente

3.1. Distribución de temperaturas en el suelo

Con un funcionamiento continuo de la instalación, la temperatura del suelo a la altura de los tubos se mantiene en unos 22°C y en la zona media (20 cm. de profundidad) oscila entre 18-19°C (Juste, 1985).

A pesar de que las temperaturas del suelo son bastante elevadas, el efecto de los tubos calientes disminuye considerablemente hasta la llegada a la superficie del suelo. Su efecto sobre la temperatura ambiente en el túnel es prácticamente nulo a partir de unos 25 cm. de altura. En el caso de suelo calentado al aire libre, las temperaturas alcanzadas en profundidad son parecidas a las de túnel, pero el efecto sobre la atmósfera apenas llega a algunos cm. por encima del suelo.

El calor cedido al suelo por las tuberías enterradas se halla entre

35-40 W/m² en los meses de invierno. De este aporte global al suelo, el 30-40% se pierde en las capas profundas y muy poco pasa al ambiente del invernadero. Este pequeño calor aportado por el sistema de tuberías enterradas no fue suficiente para proteger el cultivo durante los primeros días de Enero de 1984 con temperaturas exteriores de 3-4°C bajo cero. En el invernadero caliente las plantas sufrieron heladas a partir de 25-30 cm. y en el testigo se helaron completamente.

A partir de esta helada se instaló una segunda parrilla superficial de tubos coarrugados que aportaba al suelo y al ambiente una energía de 40-50 W/m². Asimismo se instaló una doble pared en el invernadero y los cultivos se desarrollaron con normalidad.

En el modelo de simulación de las bancadas experimentales se ha estudiado de una forma controlada la distribución de temperaturas en el suelo según: temperatura del agua y separación de los tubos. Para el sistema de tuberías superficiales se puede apreciar que para temperaturas del agua de 25-35°C es necesario ir a unas separaciones de 15-30 cm. y para temperaturas de 45°C se obtienen buenos resultados con separaciones superficiales a 30 cm.

En el caso de tuberías enterradas no se ha empleado la temperatura de 45°C ya que el suelo alcanza temperaturas muy altas y no son aconsejables en ningún tipo de cultivo. En este caso el suelo se mantiene a temperaturas superiores al caso de tuberías superficiales pero la influencia en el ambiente del túnel es pequeña en todos los casos.

En la figura 1 se ha representado un ejemplo de las temperaturas del suelo y ambiente así como el perfil de temperaturas en el suelo caliente y testigo para unas temperaturas del agua de 25°C. Las tuberías superficiales con separación de 60 cm. dan un aporte de calor de 60 W/m² y únicamente ejercen un cierto aumento de temperaturas en las zonas próximas a la tubería. En el caso de 30 cm. de separación el aporte de calor es de 92 W/m² y ya todo el suelo presenta una elevación de temperatura considerable.

Con tubos enterrados y separación de 60 cm. (fig. 1) el suelo experimenta un aumento importante de temperaturas aunque en ambiente el incremento es apenas de unos 3°C. El aporte de calor al suelo en este caso ha sido de 55 W/m². Con una separación de 30 cm. y un aporte de calor de 73 W/m², las temperaturas en el suelo oscilan entre 16 y 20°C y en ambiente el incremento de temperaturas con respecto al túnel testigo es de unos 4-5°C que es lo mínimo necesario para salvar los riesgos normales de heladas, aunque no son suficientes para un desarrollo normal del cultivo.

3.2. Modelos de transmisión de calor

Para el cálculo teórico del calor aportado por los tubos se han empleado dos modelos: 1º) Modelo de Kendrick y Havens (1973) con conductividad térmica constante y 2º) Modelo de Elementos Finitos (Juste, F., 1984) con conductividad térmica variable con la distancia al tubo y la profundidad. Para la determinación de la conductividad térmica se ha es-

tudiado el efecto de la humedad y densidad del suelo y el flujo de calor. Los valores obtenidos dan una conductividad térmica variable únicamente con la distancia al tubo, ya que la humedad del suelo se mantiene constante y muy elevada (15-20%) al ser cultivos hortícolas y cubiertos de plástico.

Los valores adoptados para la conductividad térmica en el modelo de Kendrick son 1.04 W/m°C para el suelo de Castellón y 1,64 W/m°C para la arena del modelo de simulación. En el caso del modelo de Elementos Finitos los valores que mejor han aproximado el modelo teórico al experimental son valores dependientes de la profundidad y de la separación del tubo y varían entre 0,7 y 1,5 W/m°C.

El modelo de Kendrick da valores diferentes a los obtenidos experimentalmente debido, sobre todo, a que no tiene en cuenta ni la variación de la conductividad térmica del suelo ni la influencia del calor aportado por el sol. Con el modelo de los elementos finitos, estos factores pueden ser tomados en consideración y los resultados de temperaturas y energía perdida por los tubos enterrados se pueden ajustar con gran precisión a los resultados experimentales.

En la figura nº 2 se ha representado la distribución de temperaturas en el suelo a partir de las tuberías enterradas a 35 cm. de profundidad y separadas 55 cm. (Parcela experimental de Castellón). En esta figura puede apreciarse como el modelo teórico se ajusta bastante bien a los resultados experimentales en la superficie del suelo y zonas próximas a los tubos pero presenta una ligera variación en las zonas centrales.

4. Respuesta de los cultivos al calentamiento del suelo

En este trabajo se indican principalmente los resultados obtenidos en 1984 ya que durante 1985 la Central no ha funcionado.

4.1. Cultivo de fresas

Se eligió la variedad Douglas y la plantación se hizo el 22 de Julio del 83 con plantas frigo sobre bancadas de 1,1 m. y con el suelo recubierto de polietileno negro. La densidad de plantación fue de 90.000 plantas/Ha.

En el tunel con suelo calentado la floración fue más abundante; las heladas de Enero y Febrero no afectaron el desarrollo de la planta, y la producción precoz fue buena. Por contra en cultivo al aire libre la calefacción del suelo adelantó en varios días la recolección, pero el porcentaje de flores heladas fue de 19%, aunque en suelo testigo las flores heladas fueron superiores al 80%.

Debido a los problemas de salinidad del suelo la producción no ha sido la esperada, pero es apreciable el efecto del calentamiento del suelo sobre el cultivo. Así, en el cultivo bajo tunel se obtuvo un aumento de producción del 16% sobre el suelo caliente y con un adelanto de más de 20 días (fig. 3). Resultados parecidos pudieron ser apreciados en el cultivo al aire libre, pero con precocidades más grandes debido a las heladas de Enero-Febrero, que afectaron muchas flores en el cultivo testigo.

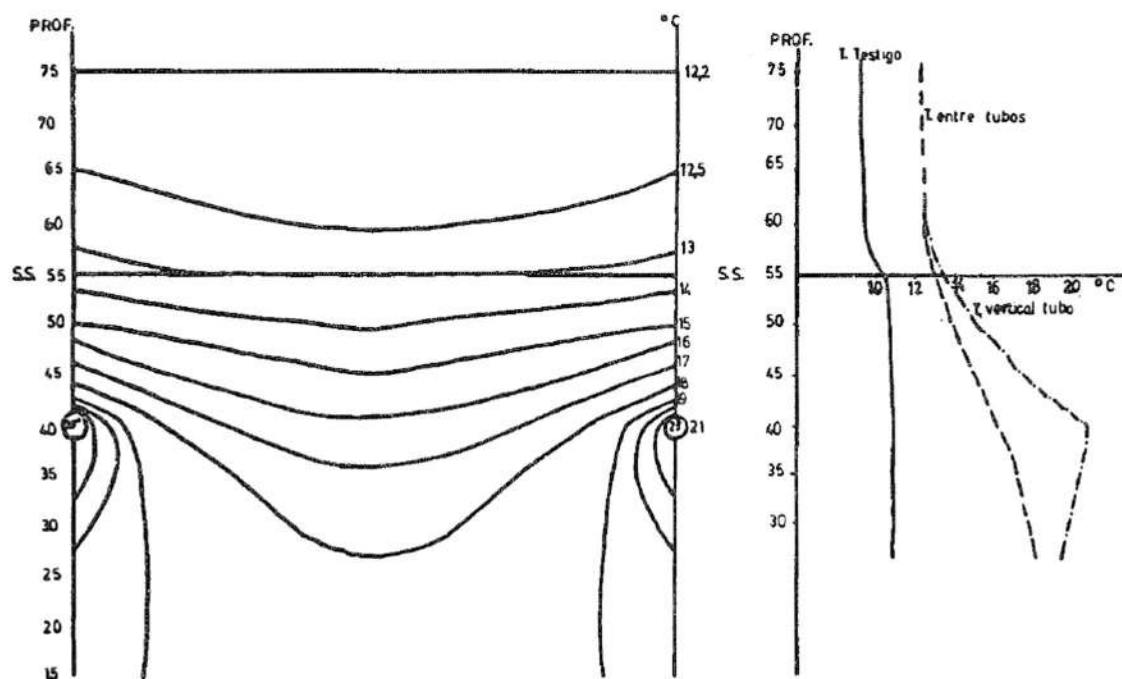


Fig. 1.- Perfil de temperaturas en suelo y ambiente con tuberías enterradas (15 cm.) y temperatura del agua de 25°C (Separación = 60 cm.)

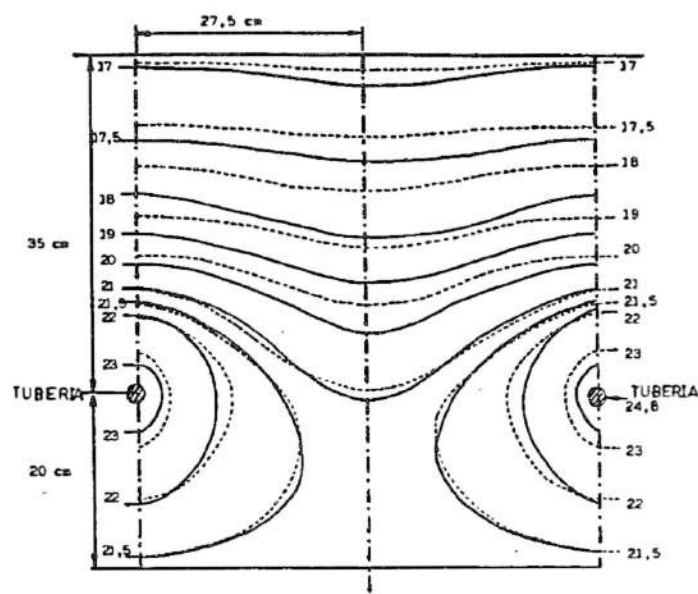


Fig. 2.- Perfil de temperaturas, obtenido en Castellón, con una red de tubos enterrados.

— Perfiles experimentales
 ---- Perfiles teóricos, según modelo de los elementos finitos.

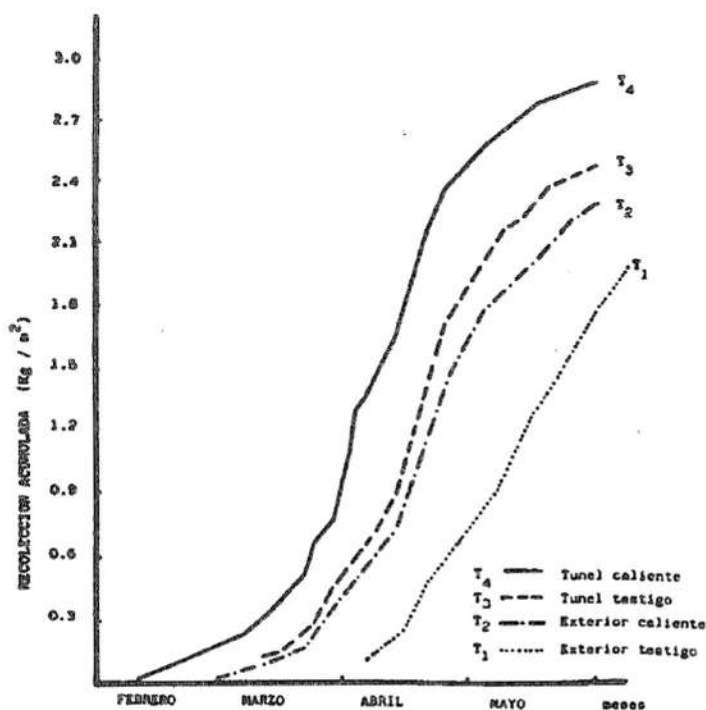


Fig. 3.- Influencia de la calefacción del suelo sobre la producción en fresas.

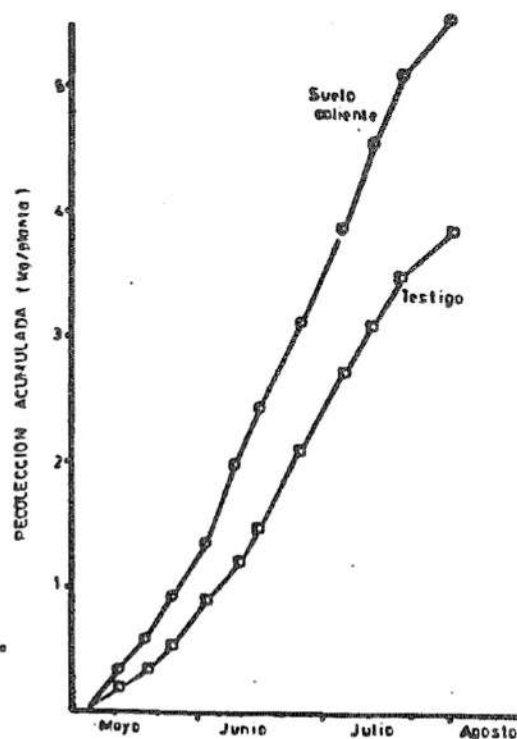


Fig. 4.- Influencia de la calefacción del suelo en la producción de tomate.

A pesar de la obtención de producciones mayores en el suelo caliente al aire libre, estas son inferiores a las obtenidas en el túnel testigo, por lo que la rentabilidad de las instalaciones al aire libre parece menor.

4.2. Cultivo de tomates

Para el cultivo de tomates se eligió la variedad Carmelo, y se realizaron plantaciones sucesivas en Julio y Octubre bajo los 4 tratamientos indicados anteriormente y en Noviembre en cultivo bajo túnel solamente.

Las plantaciones realizadas bajo túnel sufrieron daños en la helada del 11 de Enero de 1984 con mínimas exteriores de 3°C bajo cero, teniendo hasta ese momento un buen desarrollo vegetativo y producción bastante buena. Por las temperaturas alcanzadas la instalación no es suficiente para mantener el cultivo en invierno, sin riesgo de helada.

Posteriormente se realizó una plantación el 15 de Febrero de 1984, bajo túnel de plástico con dos paredes de polietileno y una parrilla superficial. De esta forma, se consiguieron temperaturas mínimas en el túnel superiores en 5 ó 6°C a las exteriores, y el cultivo se desarrolló perfectamente.

El efecto del calentamiento del suelo sobre esta plantación de primavera se tradujo en un adelanto de 5 días en la floración y en la forma-

ción de la humedad en el suelo). Se ha determinado también su influencia sobre la producción y la calidad de la fruta.

Existe una bibliografía bastante reducida y en ocasiones contradictoria en sus resultados finales, sobre los efectos de los distintos sistemas de manejo del suelo en cítricos. Esta discrepancia es debida principalmente a las condiciones particulares de cada zona y especialmente a la pluviometría, sistema de riego y textura del suelo.

Los sistemas de no-cultivo reducen la capacidad de infiltración de agua de una forma considerable, bien sea por compactación del perfil cultural o por formación de una costra superficial prácticamente impermeable (HILLEL y GARNER, 1970; POMARES, 1975; AWADHAWAL y THIERSTEIN, 1985). Esta disminución de la capacidad de infiltración debe compensarse en cítricos con una mayor frecuencia de riegos o con el establecimiento de barreras transversales en las líneas de riego que aumenten el tiempo de permanencia del agua en el suelo (JUSTE et al., 1985).

Respecto a la producción y calidad de la fruta obtenida por los distintos sistemas de cultivo, los resultados son contradictorios. Así, JONES et al. (1961) obtienen en Washington Navel mayores producciones con sistemas de no cultivo. Resultados similares hallan CARY y EVANS (1972) en una experiencia de diversos sistemas de manejo del suelo durante 21 años. En esta experiencia, los sistemas de no cultivo tienen una mayor producción, pero la capacidad de infiltración del suelo se reduce considerablemente, aunque no tiene influencia sobre la capacidad de almacenamiento de agua ya que emplean un sistema de riego por aspersión.

Por el contrario, RODRIGUEZ y MOREIRA (1964) obtienen en Brasil una mayor producción con suelo cubierto y acolchado artificial. Asimismo en Brasil, OLIVEIRA et al. (1976) obtienen que el tratamiento con mayor producción en cítricos es el sistema de laboreo con grada de discos.

CARY y WEERTS (1977) expresan, respecto a la influencia de los distintos tratamientos sobre la calidad de la fruta, que el contenido en ácido y el espesor de corteza de fruto son mayores en los tratamientos de laboreo que en los de no cultivo. Por el contrario ECONOMIDES (1976), no obtiene diferencias significativas entre los distintos sistemas de cultivo y no cultivo.

Todos estos datos y la experiencia acumulada en estos tres años hacen difícil establecer un sistema único de manejo del suelo y es necesario adoptar aquel sistema que mejor responde a las necesidades particulares de cada explotación, teniendo en cuenta aquellos puntos que más van a influir en el desarrollo del árbol, como son temperatura del suelo, compactación, capacidad de infiltración y retención de agua.

2. Materiales y métodos

El trabajo se ha realizado en terrenos del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (I.V.I.A.) de Moncada (Valencia), sobre una parcela de 0'9 ha de naranjos variedad Washington Navel, con un marco de plantación a tresbolillo de 6 m. y suelo de textura franco-arenosa. El siste

Respecto a los primeros resultados obtenidos con el sistema de simulación podemos indicar:

- Con este tipo de tuberías coarrugadas, enterradas o en contacto con el suelo, no pueden emplearse temperaturas del agua superiores a 35-40°C ya que las temperaturas alrededor de las tuberías son muy elevadas. Si las temperaturas del agua son superiores a 40°C las tuberías deben colocarse en el aire y evitando el contacto con la planta o el suelo.

- Para el caso de agua procedentes de la Central Térmica que sus temperaturas oscilan alrededor de 25°C, es necesario emplear separaciones de 15 cm. para tuberías superficiales o si se pretende calentar únicamente la zona radicular con tubería enterrada, estas pueden separarse hasta 30 cm.

- Este tipo de tuberías coarrugadas aumenta en un 70-80% la eficacia en la disipación de calor al suelo respecto a las tuberías lisas.

Referencias bibliograficas

- Boersma, L., et al., 1974. A systems analysis of the economic utilization of warm water discharge from power generaticns stations. Eng. Exp. Sta. Bull. No. 48, Oregon State Univ., Cornallis.
- Boyd, L., Stansfield, R., Ashley, G., Hietala, J., Tonkinson, T., 1977. Greenhouse heating with warm water from electric generaticns plants. International Symposium on controlled environment agriculture. Abril 1977. Tucson. Arizona.
- Guillermín, P., Delmas, J., Grauby, A., 1976. Utilisation agricole des rejets thermiques d'origine industrielle. C.R. Acad. Agric. Fr. 62 p. 775-793.
- Juste, F., 1984. Utilización en agricultura del calor residual procedente del agua de refrigeración de la C.T. de Castellón. Hidroeléctrica Española. Special Rept. 50 pag.
- Kendrick, J.H., and Havens, J.A., 1973. Heat transfer models for a subsurface, water pipe, soil-warming system. J. Environ Quality, Vol. 2, no. 2.
- Muller, A., 1977. Valorisation des eaux tièdes des centrales thermiques. Direction de l'Equipment Electricite de France.
- Rykboost, K., Boersma, L., Mask, H., and Schmisser, W., 1975. Yield response to soil warming: Agronomic crops. Agronomy journal 67 (6), p. 733-738.
- Skaggs, R.W., Senders, D.C., and Willey, C.R., 1976. Use of waste heat for soil warming in North Carolina. Trans. ASAE. vol. 19 No. 1.
- Skaggs, R.W., Willey, C., and Sanders, D., 1973. Use of waste heat for soil warming in North Cardina, paper de ASAE nº 73-3530.
- Sondern, J.A., 1977. Soil warming in the open. Research Report 77-5. Inst of Agr. Engr. Wageningen. The Netherlands.
- Soressi, G., Schiavi, M., Tosi, A., and Marchesi, E., 1982. Utilizzazione in orticoltura di acque calde reflue da centrali termoelettriche. Colt. Protettè IV p. 15-19.
- Williams, G., 1973. Waste heat utilization in greenhouse and other agriculturally related projects. Proc. Conf. Oak Ridge nats. Lab. Gatlinburg Tenn. pp. 193-209.